

Article, Published Version

**Gebhardt, Michael**

## **Analyse von Schadensfällen an bestehenden Schlauchwehranlagen**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102599>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gebhardt, Michael (2007): Analyse von Schadensfällen an bestehenden Schlauchwehranlagen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 91. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 87-92.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Analyse von Schadensfällen an bestehenden Schlauchwehrranlagen

DR.-ING. MICHAEL GEBHARDT, DR.-ING. JÜRGEN STAMM, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, KARLSRUHE

## 1 Erfahrungen mit der Einführung neuer Wehrverschlüsse

In der Vergangenheit wurden mit der Verwendung neuer Verschlussarten auch schlechte Erfahrungen gemacht, so z. B. mit den ersten um 1900 gebauten Walzenwehren, die anfangs ohne das heute übliche Stauschild am unteren Teil des Walzenkörpers ausgestattet waren. Wurden die Verschlüsse bei Hochwasser gezogen, so erzeugten die sich periodisch ablösenden Wirbelkräfte quer zur Strömungsrichtung, die die Wehranlage in Schwingungen versetzten. Ein Beispiel dafür war der Schaden an der Staustufe Poppenweiler am Neckar im Jahr 1912, bei dem durch Schwingungen sogar das Windwerk auf dem Wehrpfeiler aus den Lagern gerissen wurde [1]. Negative Erfahrungen wurden auch bei Wehrranlagen mit Doppelschützen gemacht, wie beispielsweise an der Donaustaustufe Kachlet oder der Rheinstaustufe Kembs unterhalb von Basel, bei denen Sogkräfte auf dem ebenen, geneigten Überfallrücken die Ursache für die Zerstörung der Oberschütze waren [2]. Vor diesem Hintergrund ist es daher nicht überraschend, dass auch mit der Schlauchwehrrtechnologie zunächst nicht nur positive Erfahrungen gemacht wurden. Hier finden sich fünf gut dokumentierte Schadensfälle an der Ölsperre Hochfelden (Schweiz), der Staustufe Hollerich (Deutschland), der Barrage de Villers devant Mouzon (Frankreich), des Sunbury Dam (USA) und des Mangla Dam (Pakistan), die zwischen 1965 und 1985 in Betrieb genommen wurden. Eine ausführliche Beschreibung der Anlagen und der dabei aufgetretenen Schäden ist [3] zu entnehmen. Im Folgenden stehen die Schäden am Sunbury Dam und am Lahnwehr Hollerich im Mittelpunkt, deren Ursachen aufgezeigt und diskutiert werden.

## 2 Die Schäden am Sunbury Dam (USA)

### 2.1 Die Beschreibung der Wehrranlage und der aufgetretenen Schäden

Der Sunbury Dam oder auch Adam T. Bower Dam (Bild 1) befindet sich am Susquehanna River, ca. 65 km südlich von Wilkes-Barre in Pennsylvania, USA. In den Sommermonaten entsteht hier durch den Aufstau des Lake Augusta, ein Teil des Shikellamy State Parks, der jährlich viele Naherholungssuchende anzieht. Bei der Staustufe handelt es sich um eine 640 m lange, 7-feldrige Wehrranlage mit einer Verschlusshöhe von 2,90 m. Die im November 1966 fertig gestellte Anlage wurde mit einer 5 mm dicken, zweilagig verstärkten Schlauchmembran ausgestattet, die mit zwei Befestigungs-

schienen an der Wehrsohle befestigt waren. Ursprünglich wurden die Schlauchwehre mit einer kombinierten Luft-/Wasserfüllung betrieben, wobei die Schläuche zu ca. 1,00 m mit Wasser gefüllt waren. Der absolute Innendruck der Anlage betrug 1,175 bar [4]. Im langjährigen Mittel werden in diesem Abschnitt des Susquehanna River 753 m³/s abgeführt, das größte Hochwasser mit 17.500 m³/s wurde im Jahr 1972 beobachtet.

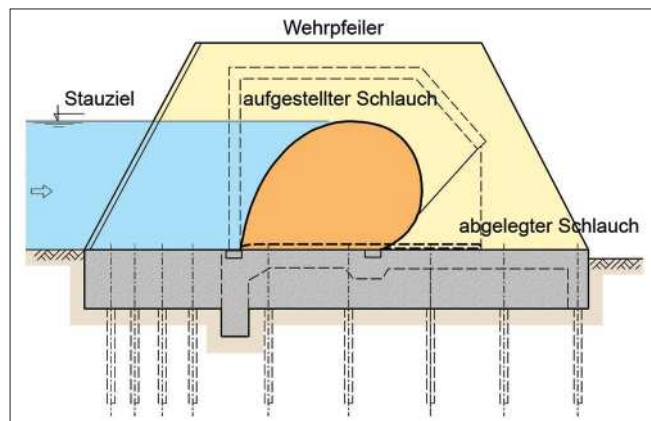


Bild 1: Querschnitt des Sunbury Dam

Bereits kurz nach der Fertigstellung wurden an den Seitenflächen der Schlauchkörper, zwischen Wehrpfeiler und Befestigungsschienen, Scheuerstellen bemerkt, die sich zunehmend vergrößerten. Bevor Reparaturmaßnahmen durchgeführt werden konnten, zerstörte im Juni 1972 ein extremes Hochwasser sechs der sieben Schlauchwehre. Von August 1972 bis Oktober 1974 wurden daher die Schlauchmembran durch neue, dreilagige Membran ersetzt. In den folgenden 11 Jahren mussten wiederholt, insgesamt 16 Mal, einzelne Membran ausgetauscht werden, weil die Leckagen so groß waren, dass die Schlauchkörper nicht mehr gefüllt werden konnten. Im Zeitraum von 1984 bis 1988 wurden die Schlauchkörper dann durch ein anderes Fabrikat ersetzt, das ein etwas anderes Konzept aufwies: Die Membranstärke betrug 13,5 mm, also fast drei Mal so dick wie die Originalmembran. Als Füllmedium wurde nur noch Luft verwendet und im Schlauchinneren wurden Entlüftungsleitungen angebracht. Die neuen Membran wiesen eine größere Abriebsbeständigkeit, einen Deflektor sowie eine höhere Anzahl von Befestigungsankern auf, um die Wahrscheinlichkeit des Herausziehens der Membran aus den Befestigungsschienen zu verringern. Obwohl die Membran für eine Lebensdauer von 30 Jahren ausgelegt waren, mussten im Jahr 2000 zwei der Membran nach der Hälfte ihrer prognostizierten Lebenszeit ausgetauscht werden, weil diese undicht geworden waren [5].

## 2.2 Schadensursachen

Die Schäden im Zeitraum 1966 bis 1988 sind zum einen auf die, im Vergleich zu heutigen Schlauchwehren verwendeten, dünneren Membrane und die geringere Abriebsbeständigkeit des Materials zurückzuführen. Ursache für die elastische Verformung der Verschlüsse und die Abrasionsschäden waren aber nach [6] selbst erregte Schwingungen im teilabgelegten Zustand. Da die Schlauchkörper keinen Deflektor aufwiesen, war der Ablösepunkt des Überfallstrahls in der Lage nicht stabil und die Druckschwankungen regten den Schlauchkörper zu Schwingungen an. Hinzu kam, dass durch die unzureichend konzipierten Entleerungseinrichtungen die Schlauchkörper nicht vollständig entleert werden konnten und dadurch ein Restvolumen im Inneren verblieb. Durch die Überströmung wurde der nur teilweise abgelegte Schlauch zu Querschwingungen angeregt und scheuerte sich an der Wehrsohle sowie an den Wehrwangen auf. Mit dem neuen Schlauchtyp erhöhte sich die Betriebssicherheit nach 1988 wesentlich und in den ersten Jahren traten keinerlei Schäden auf [4]. Das dennoch zwei der sieben Schlauchkörper bereits nach 14 Betriebsjahren ausgetauscht werden mussten, führt das U.S Army Corps of Engineers darauf zurück, dass die Schlauchmembrane über den Winter, also über eine Dauer von mehreren Monaten, vollständig entleert auf der Wehrsohle lagen und durch Eis und Treibgut beschädigt wurden [5] (Bild 2).

Am Sunbury Dam, eine der größten und ältesten Stau-stufen mit Schlauchwehren als Verschlüssen, ist die technische Entwicklung der Schlauchwehrentechnologie in den letzten Jahren gut zu erkennen. Insgesamt zeigt sich, dass durch die besonderen Betriebsbedingungen (mehrmonatige Staulegung über den Winter) im Vergleich zu anderen Anlagen mit einer geringeren Lebensdauer der Membrane zu rechnen ist.



Bild 2: Sunbury Dam mit teilweise abgelegten Schlauchwehren [7]

## 3 Die Schäden am Lahnwehr Hollerich

### 3.1 Die Beschreibung der Wehranlage und der aufgetretenen Schäden

Das Wehr Hollerich (Bild 3) liegt zwischen Nassau und Obernhof und ist eine von insgesamt 29 Wehranlagen an der Bundeswasserstraße Lahn. Hier im voll staugeregelten Abschnitt bei Lahn-km 113,08 befindet sich neben der Schleuse das zweifeldrige Walzenwehr, das in den Jahren 1926 bis 1927 anstelle eines Streichwehres errichtet wurde. Aus der vorgegebenen Lage ergab sich die schräge Anströmung des Wehres, dessen Achse um etwa  $45^\circ$  im Verhältnis zur Hauptströmungsrichtung geneigt ist. Rund 50 Jahre später wies die Wehranlage so starke Schäden auf, dass ein Durchbrechen der Anlage befürchtet wurde. Auf Grund fehlender Haushaltsmittel war ein Wehrneubau trotz der Dringlichkeit nicht möglich, sodass das damalige Wasser- und Schifffahrtsamt Diez Sicherungsmaßnahmen vorsah, die im Fall eines Wehrdurchbruchs eine kurzfris-



Bild 3: links: Blick vom Unterwasser auf die Wehranlage Hollerich mit dem im Bau befindlichen Schlauchwehr vor dem rechten Wehrfeld; rechts: Baustelle mit gefülltem Schlauchwehr



89

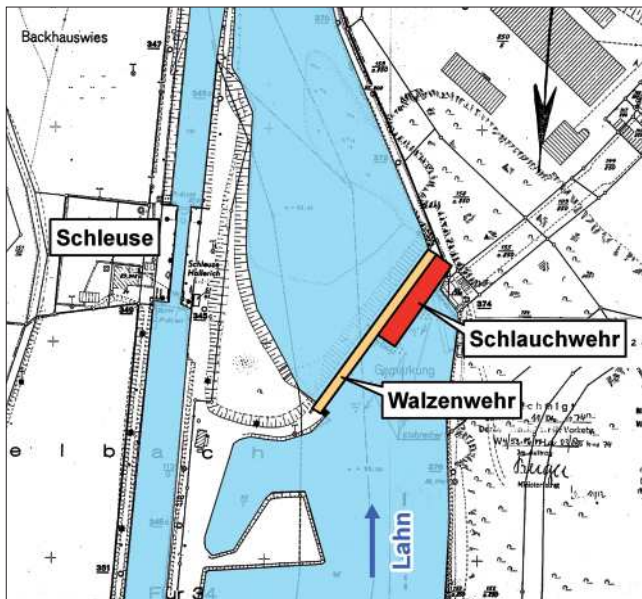


Bild 5: Lageplan der Lahnstaustufe Hollerich mit dem Schlauchwehr [8]

reich der abgelegten Membrane schwach schießender Abfluss auftrat. Durch die Turbulenzen in der Strömung und die fluktuierenden Sohlschubspannungen wurden die Schlauchmembrane zusätzlich zu Schwingungen angeregt, das Treibgut verfrachtete sich in den in der Strömung flatternden Membrane und führte zu deren Zerstörung. Die Schutzmembran verstärkte diesen Effekt eher, als dass sie die darunter liegende Membrane vor Beschädigungen schützte, weil sie lediglich an der Befestigungsschiene im Oberwasser befestigt war.

#### 4 Die Einflussfaktoren und ihr Zusammenwirken auf die Entstehung von Schäden

Die Schäden, die bei den Anlagen auftraten, reichen von Abrasionserscheinungen an der Schlauchmembran, mit der Folge von Undichtigkeiten und eingeschränkter Funktionsfähigkeit (Ölsperre Hochfelden, Sunbury Dam), bis zur vollständigen Zerstörung der Membran (Wehr Hollerich, Mangla Dam) bzw. bis zum

kompletten Abgang der Wehrverschlüsse bei extremen Hochwasserereignissen (Villers devant Mouzon). Jeder Schadensfall war dabei nicht auf eine Ursache, sondern auf das Zusammenwirken von verschiedenen Faktoren zurückzuführen.

##### 4.1 Konstruktion und Wahl der Werkstoffe

Die ersten Anlagen zeichnen sich durch sehr unterschiedliche Materialien und Befestigungsstrukturen aus. Exotische Beispiele dafür sind die beiden Anlagen in Hollerich und Villers devant Mouzon, bei denen der Schlauchkörper nur an der Wehrsohle, und nicht wie heute üblich, auch an den Wehrwangen bzw. -pfeilern fixiert wird. Geringe Membranstärken, unterdimensionierte Befestigungsschienen und Verankerungen (Villers devant Mouzon) sind weitere Gründe, die zur Zerstörung der Anlagen führte.

##### 4.2 Unvollständige Entleerung bzw. Entlüftung

Die Verlegung der Ein- und Auslassöffnungen durch die Membran, die Verlandung der Leitungen durch Sedimente, ein zu geringes Druckgefälle oder fehlende Pumpen waren die Ursachen für die unvollständige Entleerung in Villers devant Mouzon [10]. Beim Sunbury Dam und Mangla Dam waren zusätzlich die Entlüftungsöffnungen blockiert, sodass große Luftblasen im Schlauchkörper verblieben. Durch das Restvolumen im Schlauchkörper wird der Verschluss ungleichmäßig überströmt und Querschwingungen entstehen. Dies führte an beiden Stauanlagen zu Scheuerstellen an der Membranunterseite und gleichzeitig zu hohen Membranspannungen in Querrichtung, denen sogar die Fertigungsstöße am Mangla Dam nicht standhielten [11]. Um die vollständige Entleerung zu gewährleisten, werden heute Sickermatten (englisch: drain pads) oder Entleerungsleitungen vorgesehen, sodass das Füllmedium auch bei abgelegter Membran den Auslassöffnungen zuströmen kann. An den Wehrwangen angebrachte Öffnungen stellen sicher, dass Luft aus dem Schlauchkörper entweichen kann (s. Bild 6).



Bild 6: links: Sickermatten [12]; Mitte: Entleerungsleitungen; rechts: seitliche Entlüftungsöffnungen im Wehrpfeiler

### 4.3 Anströmung der Wehranlage

Hohe Turbulenzen an der Gewässersohle können auch die vollkommen entleerte Schlauchmembran zu Schwingungen anregen und zu Abrasionen an der Membranunterseite führen. Ein Beispiel dafür ist die Ölsperre Hochfelden an einem Gewässer mit vergleichsweise großem Längsgefälle. Die Anströmung wird, neben dem Längsgefälle des Gewässers, auch durch die Lage des Schlauchwehrs beeinflusst: Dies ist sowohl bei der Staustufe Hollerich als auch bei dem Schlauchwehr am Mangla Dam der Fall, bei dem die Wehrachse im 45°-Winkel zur Hauptströmungsrichtung liegt. Hier wurden Vertikalschwingungen in Kombination mit Querschwingungen beobachtet. Dabei wird der Schlauchkörper lokal stärker überströmt und die Stelle mit dem höheren spezifischen Abfluss wanderte von einer Seite zur anderen. Ursache hierfür ist der ungleichmäßige Strömungsdruck in der Anströmung des Wehres.

### 4.4 Selbst erregte oder selbst gesteuerte Schwingungen

Dauerhafte Schwingungen in Zwischenstellungen müssen verhindert werden, da sich die Schlauchmembran dadurch an der Betonoberfläche aufschauern kann. Das Ausmaß der Beschädigung wird neben der Rauheit der Betonoberfläche und der Abriebbeständigkeit des Elastomers durch die Dauer der auftretenden Schwingungen bestimmt. Beispielsweise sind die Scheuerstellen an der Schlauchunterseite des Sunbury Dam nach [6] auf lang andauernde, selbst erregte Schwingungen zurückzuführen. Deflektoren oder eine Störkörperreihe können die Schwingungsempfindlichkeit erheblich reduzieren (siehe hierzu auch den Artikel von Gebhardt/Kemnitz „Hydraulische Bemessung von Schlauchwehren“ in diesem Heft).

## 5 Anforderungen an Planung, Betrieb und Unterhaltung

„Wir lernen mehr aus unseren Fehlern als aus unseren Erfolgen“ ist eine wissenschaftlich belegte Lebensweisheit. Daher lohnt sich ein detaillierter Blick auf die oben beschriebenen Schadensfälle. Die Beispiele zeigen, dass Schäden an Schlauchwehren vielfältige Ursachen haben können (s. Bild 7) und meistens ein Zusammenwirken mehrerer Faktoren erforderlich ist, damit es zu einem vollständigen Versagen kommt.

Aus der Analyse kann eine Reihe von Anforderungen an die Planung, den Betrieb und die Unterhaltung von Schlauchwehren abgeleitet werden:

- Die Wehrachse eines Schlauchwehrs sollte senkrecht zur Hauptströmungsrichtung liegen, um einen in Querrichtung näherungsweise konstanten Strömungsdruck zu erreichen, da der Schlauch-

körper sonst ungleichmäßig überströmt wird und das Auftreten von Querschwingungen begünstigt.

- In Gewässern mit großem Längsgefälle und daraus resultierenden hohen Fließgeschwindigkeiten und Turbulenzen an der Sohle sollte das Schlauchwehr auf einer festen Wehrschwelle montiert werden mit dem Effekt, dass sich ein Überdruck auf der Schwelle ausbildet, der die entleerte Membran auf den Ablagetisch presst und Schwingungen im abgelegten Zustand verhindert.
- Dauerhafte Schwingungen im teilabgelegten Zustand müssen verhindert werden, da sich die Schlauchmembran dadurch an der Betonoberfläche aufschauern kann. Durch Abhilfemaßnahmen können diese vermieden, zumindest aber erheblich reduziert werden. Hier erweist sich eine Störkörperreihe, die erstmalig an den beiden Anlagen in Marklendorf und Bahnitz realisiert wurde, als wirkungsvolle Alternative zu einem Deflektor.
- Je nach den Unterwasserverhältnissen am Standort hat eine Schwelle den zusätzlichen Vorteil, dass eine trockene Begehung und Unterhaltung möglich ist und der Ablagetisch von Geschwemm- und scharfen Gegenständen befreit werden kann (Gefahr des Durchstanzens).
- Ein wichtiges Kriterium zur Entscheidung für Luft oder Wasser als Füllmedium ist die Regelungsmöglichkeit: Auf Grund der gleichmäßigeren Überströmung kann bei Wasserfüllung das Stauziel über das gesamte Abflussspektrum, auch bei Unterwasserständen, die über dem Ablagetisch liegen, gehalten werden. Hier würde der luftgefüllte Schlauch auf Grund des Dichteunterschieds aufschwimmen und keine Abflusskontrolle mehr ausüben können.
- Die vollständige Entleerung bzw. Entlüftung des Schlauchkörpers muss jederzeit sichergestellt sein, da ein evtl. verbleibendes Restvolumen im Schlauch zu ungleichmäßiger Überströmung führt und Querschwingungen begünstigt. Durch Absetzbecken bzw. Filter kann der Sedimenteintrag verhindert werden. Sickermatten und Entlüftungsleitungen sichern die vollständige Entleerung.

## 6 Literatur

- [1] PETRIKAT, K.: Schwingungsuntersuchungen an Stahlwasserbauten, Der Stahlbau, 21. Jahrgang, Heft 9, September 1955, S. 198 – 202.
- [2] ACKERMANN, H.: Schwingungen an unter- und überströmten Wehren und deren Beseitigung, Der Bauingenieur, Heft 9 (1962), S. 337 – 344.
- [3] GEBHARDT, M.: Hydraulische und Statische Bemessung von Schlauchwehren, Mitteilungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung – Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik – der Universität Karlsruhe (TH), 2006.



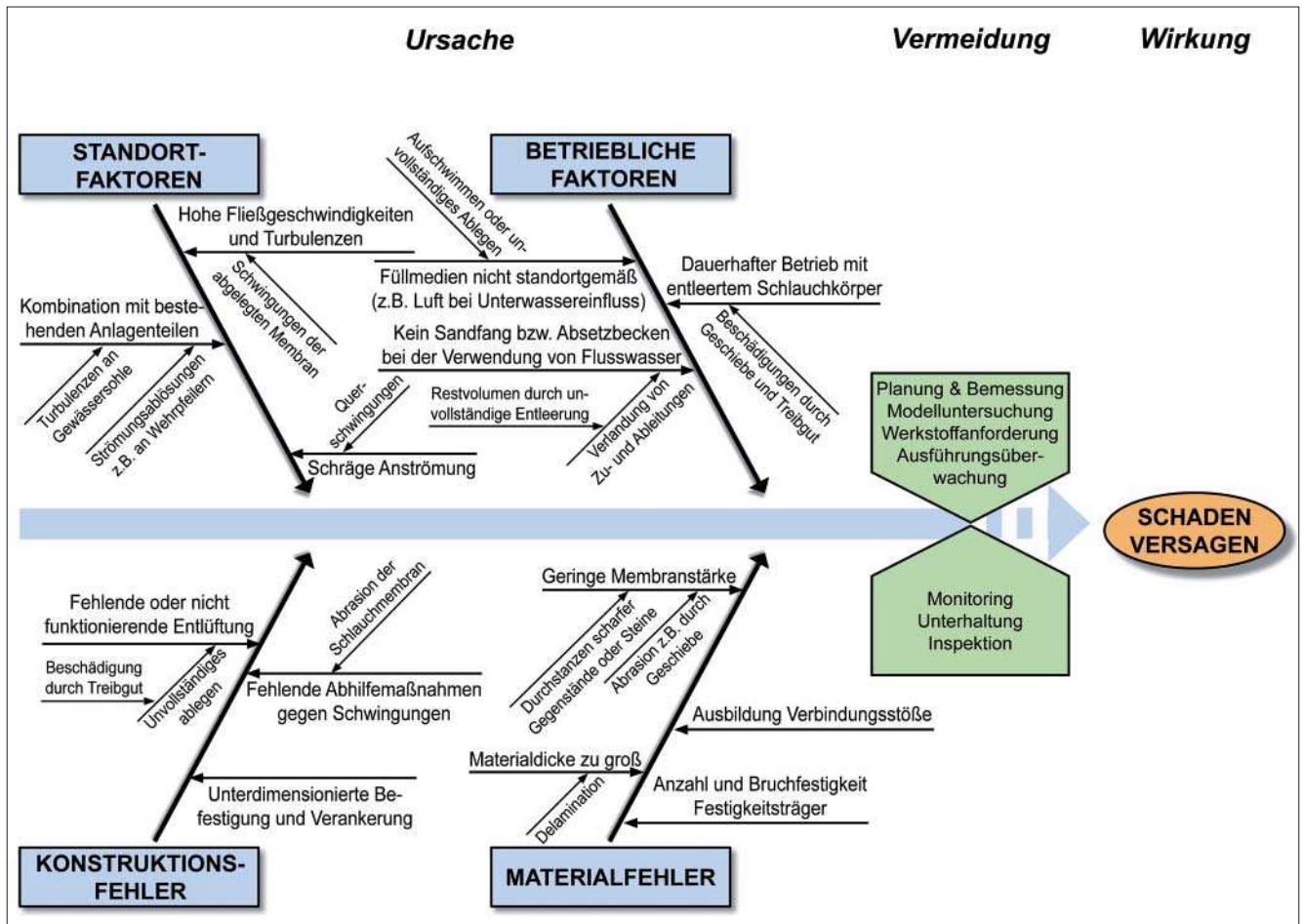


Bild 7: Ursachen für das Auftreten von Schäden an Schlauchwehren

- [4] MARINE & INDUSTRIAL NEWS: History of the Susquehanna Rubber Dam, Mitteilungen der Fa. Bridge-stone, Heft Nr. 1 (1988).
- [5] U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS: Ice Engineering, Performance survey of inflatable dams in ice-affected waters, U.S. Army Research and Engineering Laboratory, Ice Engineering Information Exchange Bulletins, Hanover, New Hampshire (Oktober 2001), S. 1 – 5.
- [6] OGIHARA, K.; MURAMATSU, T.: Rubber dam, causes of oscillations of rubber dams and countermeasures, 21st IAHR Congress, Melbourne, Australia (Aug.1985), S. 601 – 604.
- [7] PENNSYLVANIA DEPARTMENT OF CONSERVATION AND NATURAL RESOURCES: [www.dcnr.state.pa.us](http://www.dcnr.state.pa.us) (2007).
- [8] WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT DIEZ: Erfahrungsbericht und Planungsunterlagen (1960).
- [9] CHERVET, A.: Model-prototype comparison of the defective behaviour of an inflatable dam, Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Sept. 3-6 (1984), S. 1.16-1 bis 1.16-6.
- [10] VOIES NAVIGABLE DE FRANCE (VNF) DE NANCY: Mouzon Objectifs, Tischvorlage zur Besprechung am 4. April 2003 in Sedan, unveröffentlicht (April 2003).
- [11] BINNIE, G. M. et al.: Inflatable weir used during construction of Mangla Dam, Heft Nr. 7655 (1974), S.625-639.
- [12] FLOECKSMÜHLE ENERGIETECHNIK GMBH: Bilder von der Montage des Schlauchwehrs Lenna, Italien 2006.

### Danksagung

Die vorliegende Veröffentlichung basiert in wesentlichen Teilen auf der Dissertation „Hydraulische und statische Bemessung von Schlauchwehren“ von Michael Gebhardt. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. hc. mult. Franz Nestmann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Schweizerhof für die wissenschaftliche und fachliche Betreuung dieser Arbeit.